

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.384.668

СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО
ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

© 2025 г. А. Р. Ахметов^а *, А. Р. Дон^а, К. И. Живанков^б, И. А. Журавлев^а,
О. А. Никитин^а, И. В. Пензин^а, Д. П. Решетов^б, С. Д. Хренков^а

^аРоссийский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики

им. академика Е.И. Забабахина

Россия, 456770, Снежинск, Челябинская обл., ул. Васильева, 13

*e-mail: A.R.Akhmetov@vniitf.ru

^бИнститут ядерной физики имени Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

Поступила в редакцию 10.04.2025 г.

После доработки 12.05.2025 г.

Принята к публикации 09.06.2025 г.

Рассмотрены системы диагностики сильноточного электронного пучка линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20, который является основой рентгенографического комплекса. Данный комплекс предназначен для получения рентгенограмм быстропротекающих процессов, проходящих в оптически непрозрачных плотных средах. Получаемые рентгенограммы используются для калибровки расчетных программ и разработки новых физико-математических моделей. Для фокусировки на конверсионной мишени высокоинтенсивного электронного пучка с целью получения качественных рентгенограмм разработаны методики определения положения, тока, энергии, поперечного профиля пучка, а также размеров фокусного пятна на конверсионной мишени.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИТФ эксплуатируется рентгенографический комплекс, основой которого служит линейный индукционный ускоритель ЛИУ-20. Формируемое им высокоинтенсивное импульсное тормозное излучение при прохождении через объект исследования в определенной стадии быстропротекающего процесса

ослабляется в соответствии с массовой толщиной его составных частей и формирует на чувствительном элементе системы регистрации теневое изображение.

На качество получаемых рентгенограмм оказывает влияние размер фокусного пятна, который напрямую зависит от параметров электронного пучка. Для получения минимального размера фокусного пятна требуется осуществить ускорение и транспортировку пучка до конверсионной мишени без ухудшения его характеристик, таких как ток, энергия электронов и эмиттанс. Настройка режимов работы установки невозможна без контроля ранее перечисленных параметров [1].

2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Электронный пучок формируется в инжекторе и удерживается в апертуре вакуумной камеры при помощи магнитных линз. После инжектора пучок ускоряется тридцатью короткими и двенадцатью длинными ускоряющими модулями, приобретая энергию 20 МэВ. Ускорившись, он попадает в транспортный канал, в котором пучок транспортируется до мишенного узла при помощи квадрупольных линз. Схема ускорительного и транспортного каналов ЛИУ-20 представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схема ускорительного и транспортного каналов.

Определение положения центроида электронного пучка осуществляется при помощи индукционных датчиков [2]. В ускорительном канале расположено 27 датчиков, в прямом канале системы транспортировки имеется 15 датчиков [3].

Конструкция датчика положения центроида пучка представлена на рис. 2. Датчик состоит из четырех ламелей, пролетая вдоль которых, пучок наводит напряжение.

Рис. 2. Датчик положения пучка.

Сигналы с ламелей фильтруются RC-фильтрами для уменьшения уровня помех, оцифровываются и обрабатываются по формулам

$$\begin{aligned} X &= G_x \frac{U_{x1} - U_{x2}}{U_{x1} + U_{x2}}, \\ Y &= G_y \frac{U_{y1} - U_{y2}}{U_{y1} + U_{y2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где G_x, G_y – коэффициенты пропорциональности; $U_{x1}, U_{x2}, U_{y1}, U_{y2}$ – наведенное напряжение на ламелях.

Типичная осциллограмма, получаемая с датчика положения, представлена на рис. 3. На ней приведены амплитудно-временные зависимости, по соотношению которых можно судить о положении пучка и его продольной симметрии.

Рис. 3. Осциллограмма с датчика положения пучка.

С целью ускорения обработки данных о положении пучка, а также для качественной

настройки электронно-оптической системы было разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее визуализировать смещение переднего и заднего фронтов электронного пучка относительно центроида. Уменьшая отклонение фронтов, можно добиться оптимального качества пучка. Пользовательский интерфейс программы представлен на рис. 4.

Рис. 4. Пользовательский интерфейс программы отображения смещения фронтов пучка.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Основу ускорителя составляют 54 ускоряющих модуля, фотография и схема которых представлена на рис. 5. Энергия электронов напрямую зависит от напряжения, прикладываемого к индукторным секциям внутри ускоряющих модулей. Итоговая энергия определяется суммой амплитуд импульсных напряжений, подаваемых на индукторы.

Рис. 5. Ускоряющий модуль...

Снижение напряжений, прикладываемых к индукторным секциям, до уровней, допустимых высокоскоростной осциллографией, осуществляется при помощи высоковольтных делителей. Вид делителя и типичная осциллограмма напряжений с одного ускоряющего модуля представлены на рис. 6. Делитель состоит из верхнего высоковольтного плеча с эквивалентной емкостью 20 пФ и сопротивлением 51 кОм и нижнего плеча, представляющего комбинацию емкости 200 пФ и резистивного делителя с выходным сопротивлением 50 Ом, к которому подключается кабельная трасса.

Рис. 6. Высоковольтный делитель напряжения и типичные осциллограммы напряжения ускоряющего модуля.

Разработано специализированное программное обеспечение для измерения энергии электронов. Вычисляется приращение энергии на каждом ускоряющем модуле, а также суммарная энергия на всем ускоряющем тракте. Данное ПО позволяет отслеживать набор энергии вдоль всего ускорителя и оценивать корректность работы высоковольтного оборудования. Пользовательский интерфейс программы представлен на рис. 7.

Рис. 7. Пользовательский интерфейс программы отображения набора энергии электронным пучком.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА ПУЧКА

Измерение тока пучка обеспечивается трансформаторами тока, расположенными на различных участках ускорительного и транспортного каналов [3]. В ускорительном канале используется 28 трансформаторов тока, в транспортном канале – 3. Конструктивно трансформаторы представляют собой магнитопровод из аморфного сплава 2БДСР с навитой на него измерительной обмоткой, каждый виток которой шунтирован резистором для

демпфирования колебаний, возникающих из-за неоднородностей намотки и экранирования. Схема и внешний вид трансформатора тока представлены на рис. 8.

Рис. 8. Трансформатор тока: **а** – внешний вид трансформатора, **б** – схема трансформатора.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Опыт работы и анализ зарубежных рентгенографических комплексов DARHT [4] и PHERMEX [5] показал, что для настройки оптимального режима работы и верификации расчетных моделей требуется измерение поперечного профиля электронного пучка.

Измерения поперечного профиля начинались с интегральных снимков (с большой длительностью экспозиции). В качестве детекторов профиля электронного пучка применялись материалы с различными принципами образования оптического излучения (титановая фольга, сапфировое стекло, люминесцентные экраны). Объем информации оказался недостаточным, поскольку такие измерения не давали представления о продольном распределении пучка.

Одна из применяемых схем измерения поперечного профиля представлена на рис. 9. Оптическое излучение, формируемое пучком на детекторе, при помощи системы зеркал выводится на четыре камеры, три из которых электронно-оптические (СПУ-2) [6] и одна цифровая. СПУ-2 позволяет регистрировать изображения с длительностью экспозиции от 3 нс. Цифровая камера обладает длительностью экспозиции 1 мкс, за счет чего формируется интегральное изображение всего пучка. Камеры выводятся из зоны воздействия ионизирующего излучения для уменьшения уровня помех [7].

Рис. 9. Схема диагностики поперечного профиля электронного пучка.

На рис. 10 представлен пример получаемых изображений нестабильного и стабильного пучка в разные моменты времени. Моменты запуска камер настроены на фронты и тело пучка.

На данных изображениях можно видеть увеличенное сечение и смещенные фронты до настройки режима работы ускорителя. Эти факторы существенно увеличивают размер фокусного пятна, вследствие чего размываются границы конструктивных элементов исследуемых объектов в ходе их рентгенографирования.

Рис. 10. Изображения пучка до и после настройки электронно-оптической системы ускорителя.

Измерение поперечного профиля позволяет определять поперечную неустойчивость пучка. Пример визуализации поперечной неустойчивости пучка представлен на рис. 11.

Рис. 11. Визуализация поперечной неустойчивости электронного пучка.

Определение эмиттанса осуществляется с использованием элемента магнитной оптики: соленоидальной или квадрупольной линзы. При измерениях осуществляется

пошаговое измерение магнитного поля линзы и проводится сканирование сечения пучка для поиска наименьшего значения. Затем эти данные сравниваются с расчетными моделями, и по ним решается обратная задача определения эмиттанта. На рис. 12 представлено сравнение размеров смоделированного и реального поперечных профилей в зависимости от тока квадрупольной линзы.

Рис. 12. Сравнение расчетных и экспериментальных данных в зависимости от тока квадрупольной линзы.

6. СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ФОКУСНОГО ПЯТНА

Известно, что тормозное излучение формируется в результате взаимодействия электронов с материалом конверсионной мишени и распространяется как в прямом, так и в обратном направлениях. Проведенные методом Монте-Карло расчеты показали (рис. 13), что основная доля тормозного излучения выходит из мишени в прямом направлении в сторону просвечиваемого объекта исследований, но в то же время присутствует заметная доля излучения, распространяющегося в направлении, обратном направлению облучения мишени электронами [8]. Из результатов расчетов следует, что величина интенсивности обратного излучения вполне достаточна для его экспериментальной регистрации. Была реализована система оперативной диагностики фокусного пятна (СОДФП) в направлении, обратном направлению движения электронов [8, 9]. Такая схема постановки позволяет проводить измерение фокусного пятна в процессе проведения рентгенографических исследований (рис. 14).

Рис. 13. Распределение гамма-квантов и схема постановки измерений.

Рис. 14. Система оперативной диагностики фокусного пятна:

Тормозное излучение коллимируется вертикальной и горизонтальной парой сегментов цилиндров и попадает на сцинтиллятор для преобразования тормозного излучения в видимый свет. Сформированный световой поток отражается через зеркало и регистрируется цифровой фотокамерой. Регистрируемое изображение при обработке дает значения вертикального и горизонтального размера фокуса ЛИУ-20.

Результаты предоставляются оператору в режиме реального времени специализированным ПО [10]. Данное ПО проводит пошаговую автоматическую обработку согласно следующему алгоритму (рис. 15):

- автоматически осуществляется выбор областей обработки на полученном изображении (рис. 15 а);
- проводится построение профилей яркости и их усреднение (рис. 15 б);
- полученные профили аппроксимируются функцией ошибок – вычисляет размер

фокусного пятна (рис. 15 в);

- определяется “реальный” размер фокусного пятна по градуировочным кривым (рис. 15 г);
- осуществляется запись размеров фокусного пятна в электронный журнал и отображается на экране оператора сразу после пуска.

Рис. 15. Алгоритм обработки рентгенограмм, полученных по обратному тормозному излучению.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан комплекс диагностики сильноточного электронного пучка, включающий в себя оборудование для измерения энергии электронов, тока, эмиттанса и размеров фокусного пятна, а также разработано программное обеспечение для обработки результатов измерений.

В результате внедрения диагностического комплекса удалось добиться улучшения характеристик пучка и, следовательно, повысить интенсивность генерируемого излучения, что положительно повлияло на предельную просвечивающую способность комплекса. Кроме того, оптимизирован размер фокусного пятна, что позволило снизить размытие границ рентгенографических изображений и повысить точность регистрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козловский В.Н.* Информация в импульсной рентгенографии. Снежинск: Изд. РФЯЦ–ВНИИТФ, 2006.
2. *Смалюк В.В.* Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Новосибирск: Изд. Параллель, 2009.
3. *Бак П.А., Батраков А.М., Бехтенов Е.А. и др.* // ПТЭ. 2021. № 2. С. 49. <https://doi.org/10.31857/S0032816221020014>
4. *Burns M.J., Carlsten B.E., Kwan T.J.T. et al.* // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference (PAC), New York, 1999. V. 1. P. 617. <http://dx.doi.org/10.1109/PAC.1999.795776>
5. *Boyd T.J., Rogers B.T., Tesche R.R.* // Rev. Sci. Instrum. 1965. V. 36. P. 1401. <https://doi.org/10.1063/1.1719343>
6. Сверхпомехоустойчивая камера СПУ-2. Руководство по эксплуатации. НАНОСКАН, 2012.
7. *Никитин О.А., Ахметов А.Р., Решетов Д.Ф., Мешков О.И., Пензин И.В., Хренков С.Д.* РФ Патент 2809944, 2023.

8. *Kolesnikov P.A., Politov V.Yu., Li E.S., Yaskevich A.P., Kolesnikov S.A., Ekimov Yu.M., Malyshev M.A., Akhmetov A.R., Petrov D.V., Nikitin O.A. et al. // J. Instrum. 2020. V. 15. № 10. P. 10018. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/10/P10018>*
9. *Колесников П.А., Ахметов А.Р., Эверт В.Ю., Колесников С.А. РФ Патент 2738731, 2019.*
10. *Колесников П.А., Журавлев И.А., Пензин И.В., Трунев Ю.С., Куркучеков В.В., Атлуханов М.Г., Сковородин Д.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666500 Penumbra.*

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема ускорительного и транспортного каналов.
- Рис. 2.** Датчик положения пучка.
- Рис. 3.** Осциллограмма с датчика положения пучка.
- Рис. 4.** Пользовательский интерфейс программы отображения смещения фронтов пучка.
- Рис. 5.** Ускоряющий модуль: **а** – внешний вид ускоряющих модулей, **б** – схема ускоряющего модуля.
- Рис. 6.** Высоковольтный делитель напряжения и типичные осциллограммы напряжения ускоряющего модуля.
- Рис. 7.** Пользовательский интерфейс программы отображения набора энергии электронным пучком.
- Рис. 8.** Трансформатор тока: **а** – внешний вид трансформатора, **б** – схема трансформатора.
- Рис. 9.** Схема диагностики поперечного профиля электронного пучка.
- Рис. 10.** Изображения пучка до и после настройки электронно-оптической системы ускорителя.
- Рис. 11.** Визуализация поперечной неустойчивости электронного пучка.
- Рис. 12.** Сравнение расчетных и экспериментальных данных в зависимости от тока квадрупольной линзы.
- Рис. 13.** Распределение гамма-квантов по полярному углу.
- Рис. 14.** Система оперативной диагностики фокусного пятна: *1* – транспортный канал ЛИУ, *2* – фокусирующая магнитная линза, *3* – мишенный узел, *4* – конверсионная мишень, *5* – сегмент цилиндра, *6* – детектор, *7* – защитный экран из свинца.
- Рис. 15.** Алгоритм обработки рентгенограмм, полученных по обратному тормозному излучению.

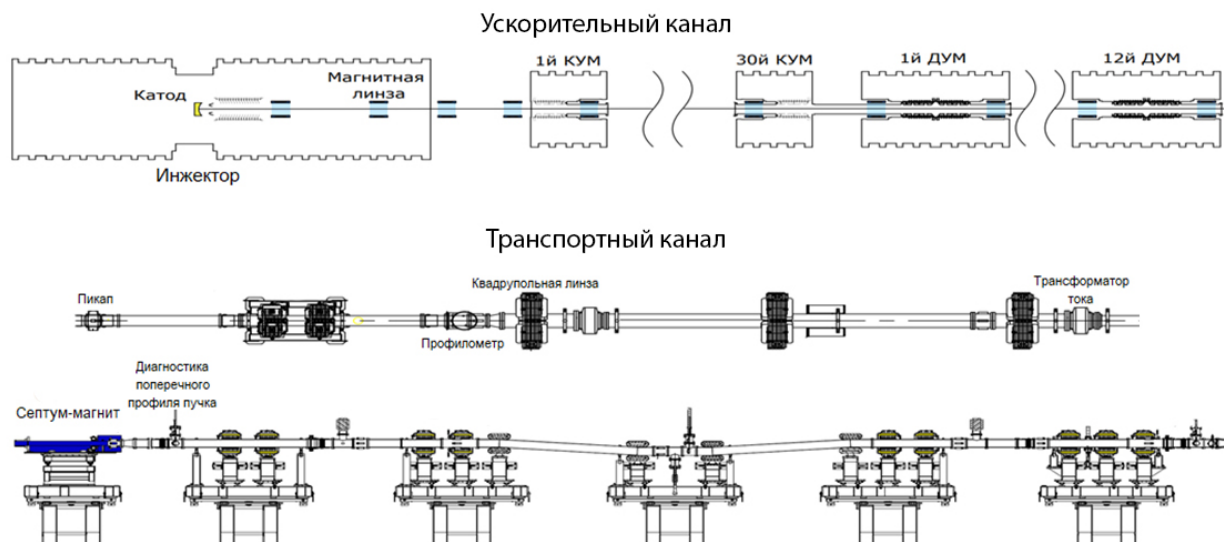


Рис. 1.

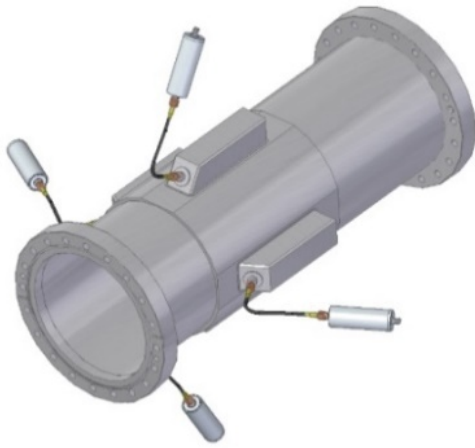


Рис. 2.

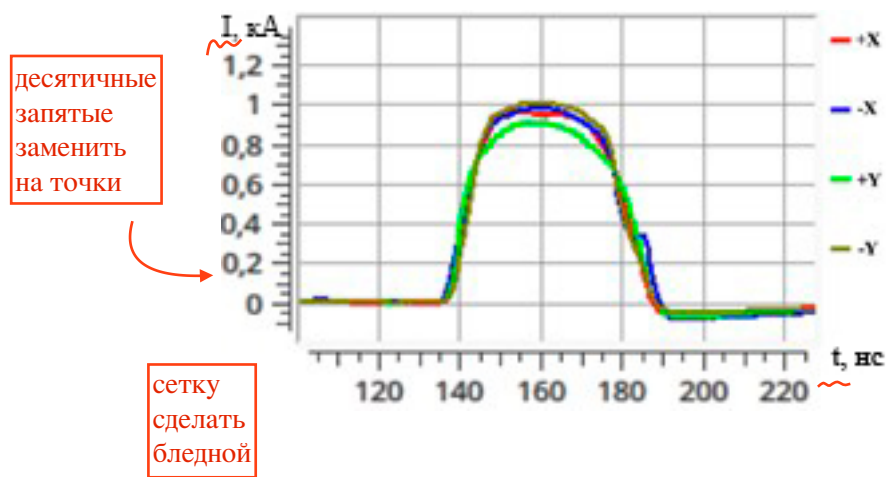


Рис. 3

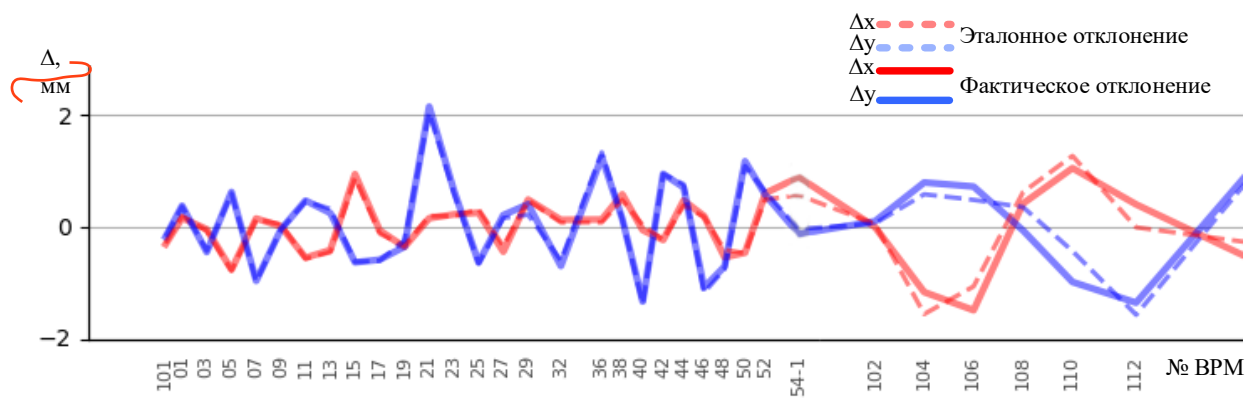
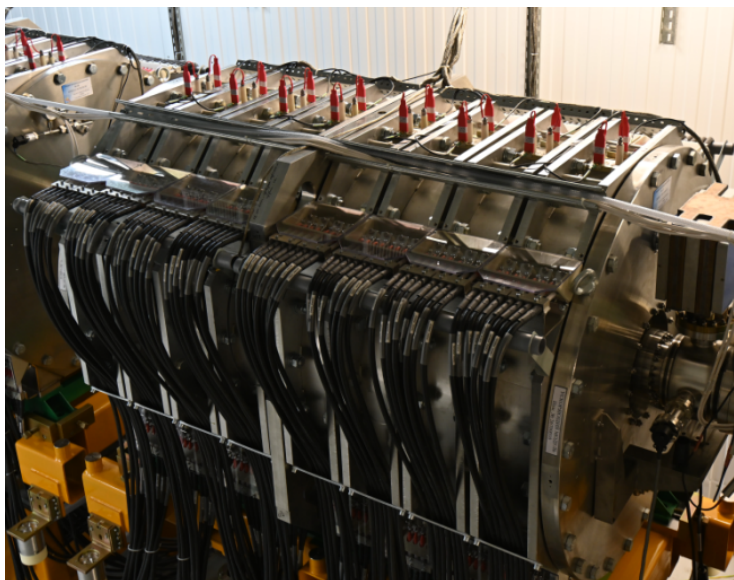
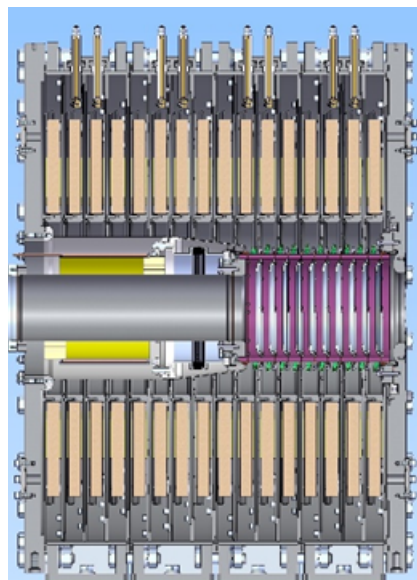


Рис. 4.



(a)

Рис. 5



(б)

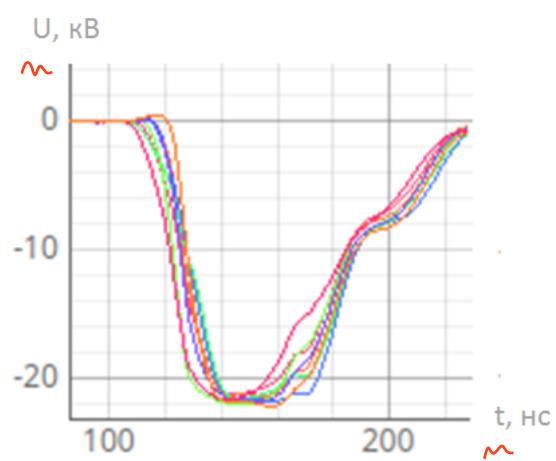
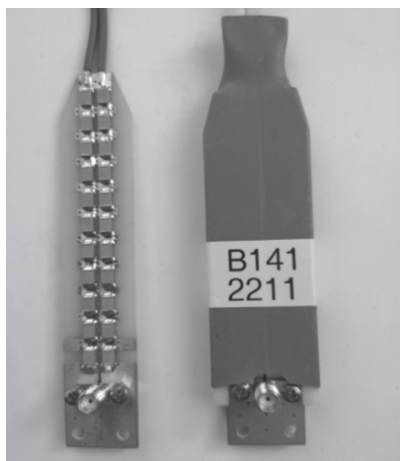


Рис. 6.

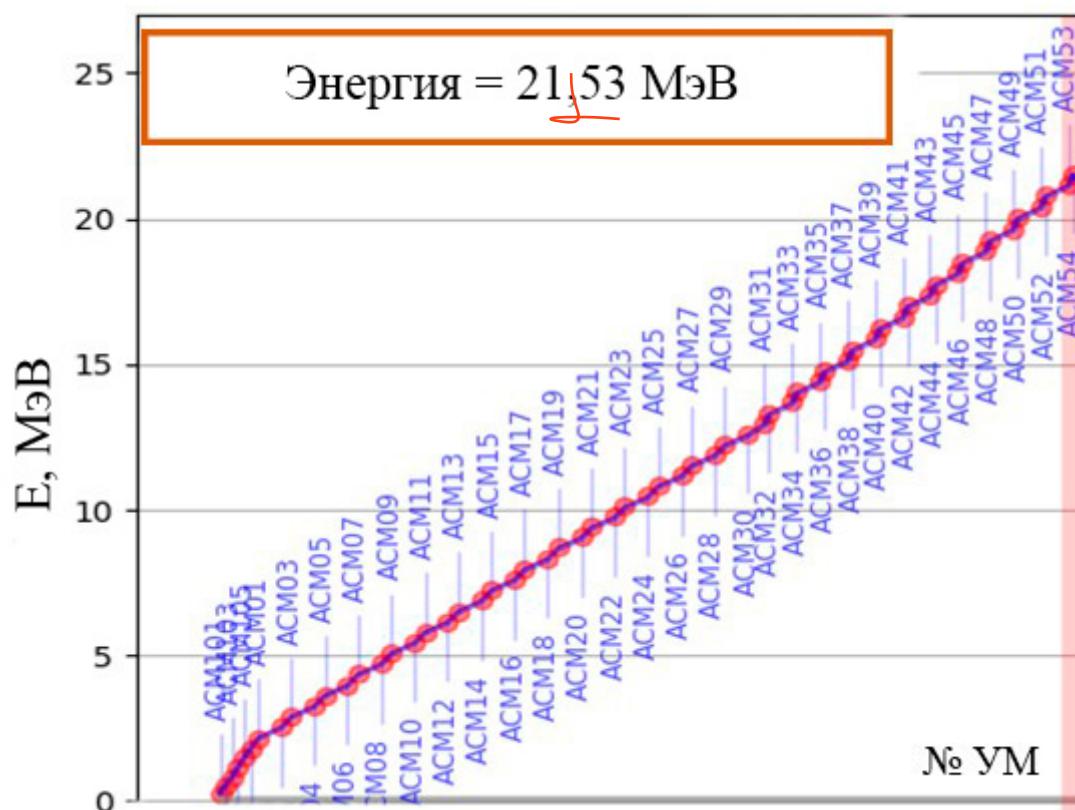
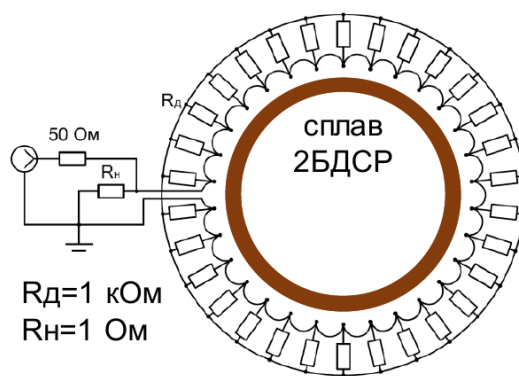


Рис. 7.



(a)



(б)

Рис. 8.

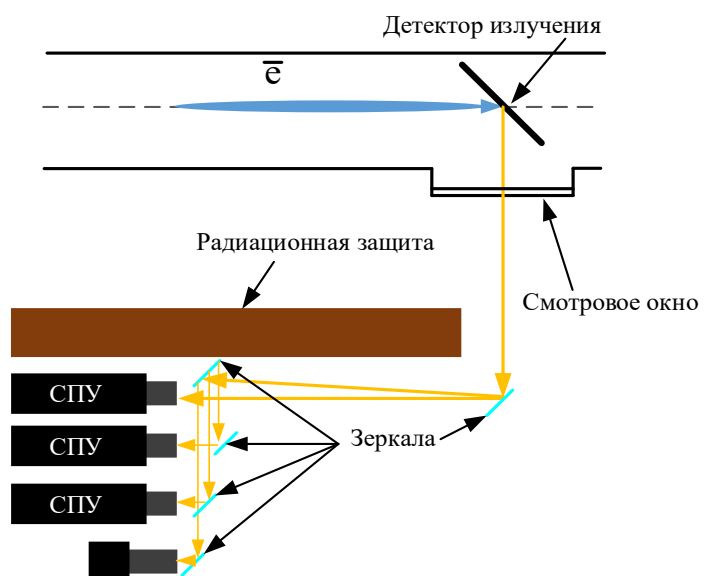


Рис. 9.

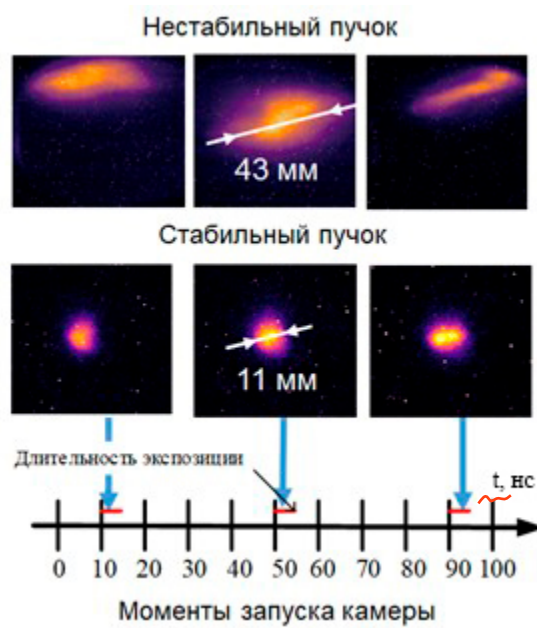


Рис. 10.

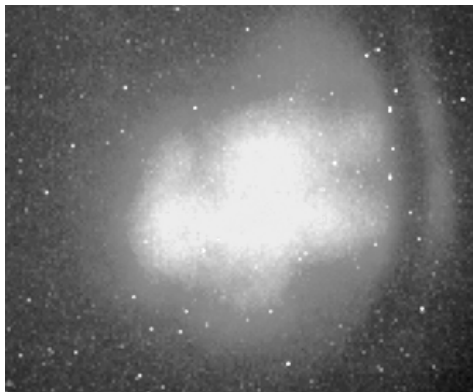


Рис. 11.

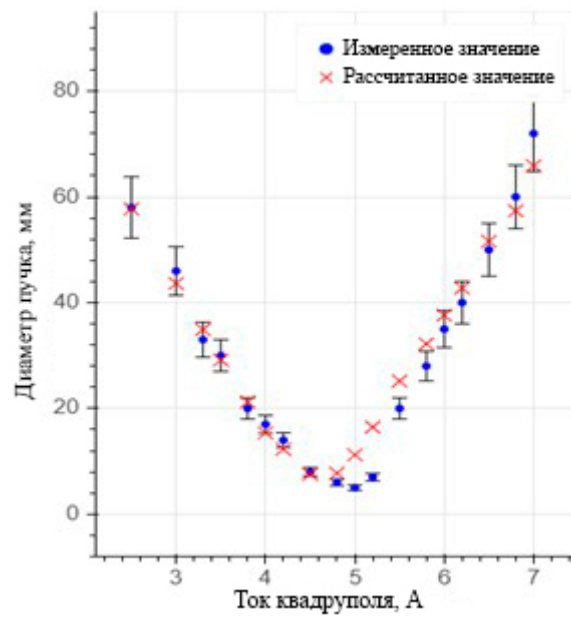


Рис. 12.

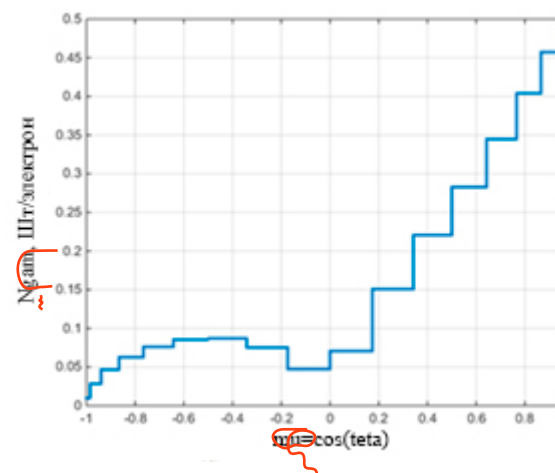


Рис. 13.

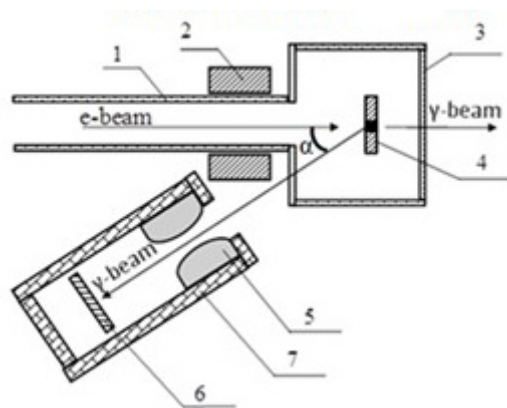
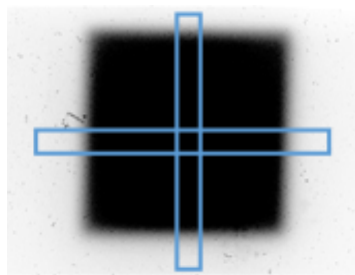
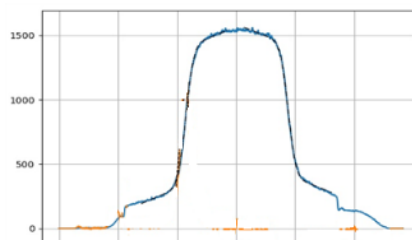


Рис. 14.

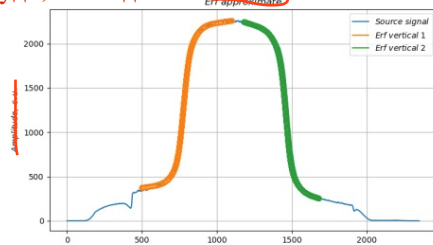


(a)



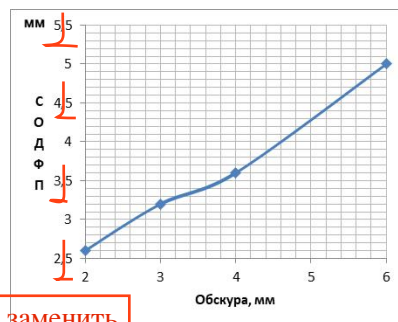
(б)

Амплитуда, отн. ед.



Пиксель

(в)



запятые заменить на точки

(г)

Рис. 15.